

**О МЕТОДАХ ОЦЕНОК ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАССИВОВ
ОСАДОЧНЫХ ПОРОД “IN SITU” ПО ДАННЫМ КАРОТАЖА**

П.А. Каменев, Л.М. Богомолов, С.А. Валетов

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, ул. Науки 1Б, г. Южно-Сахалинск, 693022;
e-mail: kamenav@rambler.ru

Поступила в редакцию 26 марта 2012 г.

Проведен расчет основных геомеханических параметров с использованием данных геофизических исследований скважин на примере Полярнинского месторождения нефти на о. Сахалин. По данным акустического каротажа рассчитаны модуль Юнга и модуль сдвига. Значения коэффициента Пуассона определены двумя методами: через упругие модули и по данным естественной гамма-активности пород. Полученные результаты могут использоваться для построения геомеханической модели месторождения, расчета диапазона плотности бурового раствора, а также оценок напряженно-деформированного состояния месторождения “in situ”.

Ключевые слова: геомеханика (геомеханические параметры), коэффициент Пуассона, модуль сдвига, модуль Юнга, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

Бурение глубоких (параметрических) скважин при разведке и освоении некоторых нефтяных месторождений о. Сахалин (в частности, Полярнинского месторождения) позволило получить информацию, важную как для уточнения геологического строения региона, так и для практических приложений. Геофизические методы исследований скважин (каротажные методы) стали основой для развития инновационных технологий в недропользовании, при котором происходит слияние различных направлений: инженерной геологии и геомеханики, промышленной геофизики и геодинамики. Вопросы комплексирования данных различных методов каротажа для получения оценок геомеханических параметров породных массивов сохраняют свою актуальность. Поясним этот момент. В современном бурении все чаще практикуется бурение горизонтальных, в частности, сверхпротяженных скважин. Так, например, на Сахалине пробурено 6 из 10 самых сверхпротяженных скважин мира. Установлено множество мировых рекордов в бурении горизонтальных сверхпротяженных скважин. Для бурения таких скважин вопрос о стабильности их стенок имеет первостепенное значение, тем более что регион расположен в области высокой тектонической активности. В наклонно направленных и горизонтальных скважинах к основной задаче устой-

чивости стенок скважины относится расчет “окна” бурового раствора, то есть предельных значений плотностей бурового раствора в зависимости от зенитного угла скважины. Для такого расчета необходимо знание модуля сдвига, модуля Юнга, коэффициента Пуассона и других геомеханических параметров. Оценки этих ключевых параметров “in situ” могут проводиться в режиме “он-лайн” непосредственно на буровой или в офисе, если в компоновке буровой колонны предусмотрены соответствующие каротажные зонды. Необходимые для расчетов данные могут также быть получены после проведения комплексного каротажа на кабеле.

В предыдущих работах традиционно основным источником данных о значениях геомеханических параметров служили материалы лабораторных исследований кернов. Но их отбор сталкивается со следующим техническим противоречием. В бурении наибольший интерес для отбора керна представляют продуктивные интервалы. А обрушения стенок скважины, например, в терригенных породах происходят, как правило, в интервалах с глинистыми сланцами. В этих интервалах крайне редко берутся керны, кроме того, зачастую в них не проводится полный комплекс каротажных исследований. При таких обстоятельствах акустический каротаж может быть подходящим методом для оценок геомеханических парамет-

ров [8, 11]. Важно, что этот способ является и более дешевым по сравнению с исследованием керна. Необходимо отметить, что и методы каротажа также существенно различаются по уровню и объему предоставляемой информации и, как следствие, по стоимости. Наиболее информативными (и достоверными) являются методики многоволнового акустического каротажа, описанные, например в [14], но их применение сдерживается из-за больших затрат по сравнению со стандартным акустическим каротажом.

В данной статье рассматриваются простейшие (стандартные) методы каротажа, позволяющие, тем не менее, проводить оценки геомеханических параметров. Эти оценки, как и новая информация о напряженном состоянии породных массивов по каротажным данным [4, 9], представляют очевидный интерес для изучения современной геодинамики Дальневосточного региона. Возможность использования упрощенных методов, в частности, предложенных в работе Хорсруда [11], в геодинамических исследованиях подразумевает их пригодность для широкого класса терригенных пород, образующих верхние слои осадочного чехла. Немногие имеющиеся данные каротажа скважин на о. Сахалин позволяют лишь косвенно проверить это предположение по устойчивости (воспроизводимости) расчетных значений параметров породных массивов: модуля сдвига, модуля Юнга и коэффициента Пуассона для нескольких близкорасположенных скважин. Согласованность оценок, основанных на разных методах, также может свидетельствовать о справедливости этого предположения.

В настоящей работе в качестве исходного материала используются результаты исследования глубоких разведочных скважин на территории Полярного нефтяного месторождения, которое расположено в Лунской впадине о. Сахалин. Месторождение приурочено к борским отложениям нижнего миоцена (рис. 1). На месторождении имеется сеть вертикальных скважин с глубиной более 3000 м, среди которых 3 параметрические скважины выделяются наибольшей плотностью каротажных данных: 4-П с глубиной 3126 м, 6-П с глубиной 2806 м и 7-П с глубиной 2938 м. Каротажные измерения были проведены Сахалинской геофизической экспедицией в 90-х годах прошлого века.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика расчета модуля Юнга (E) и модуля сдвига (G) основана на данных акустического каротажа. В нашем случае используются значения интервального времени пробега продольной волны, которые затем пересчитываются в соответствующие зна-

чения скоростей V_p . По своему физическому смыслу V_p , определяемая по данным акустического каротажа, соответствует скорости продольных (первичных) сейсмических волн. Для расчета модуля Юнга E и модуля сдвига G по данным акустического каротажа (диапазон частот 15–50 кГц) можно использовать эмпирические формулы из работы Хорсруда [11].

$$E = 0.076 V_p^{3.23} \quad (1)$$

$$G = 0.03 V_p^{3.3} \quad (2)$$

Эмпирические соотношения (1) и (2) опираются на экспериментальные данные, полученные при лабораторных испытаниях на прочность кернов глинистых сланцев совместно с акустическими исследованиями [11]. Важно отметить, что в работе [11] указан фракционный состав пород, для которых выполняются эти соотношения. Данные о составе свидетельствуют, что это могут быть не только глинистые сланцы, но и аргиллитистые песчаники. Ряд пород Лунской впадины сходны по литологическому составу с образцами, исследованными в работах [5, 11]. Процент глинистых частиц исследуемых образцов глинистых сланцев работы [5] находится в интервале от 25 до 99 %. Формулы (1) и (2) можно применить также и для аргиллитистых и алевролитистых песчаников Полярного месторождения (Лунская впадина, рис. 1).

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчета модуля Юнга и модуля сдвига по данным для трех скважин: 4-П, 6-П и 7-П. Рисунки показывают, что в исследованном диапазоне глубин значения E , G монотонно нарастают с глубиной. При этом в интервале глубин 2700–3000 м наблюдается резкий прирост. На этом интервале происходит смена стратиграфии. Кроме того, данный интервал характеризуется наличием сети разломов. Известно, что в Лунской впадине расположена одноименная цепь грабенов.

Необходимо отметить, что обращение к эмпирическим формулам (1), (2) обусловлено тем, что сама по себе классическая теория упругости не позволяет по данным о скоростях упругих волн определить ни характеристики среды (плотность, упругие модули), ни геомеханические параметры (модуль Юнга E и модуль сдвига G). Действительно, число неизвестных параметров среды – не менее трех (например, плотность, модуль всестороннего сжатия и коэффициент Пуассона), но всего два уравнения, выражающих скорость продольных и поперечных волн через эти параметры. Стоит отметить, что ввиду этих обстоятельств в сейморазведке чаще всего ограничиваются построением скоростных разрезов. Эмпирические формулы для серии осадочных пород со сходной текстурой и структурой позволяют свести слож-

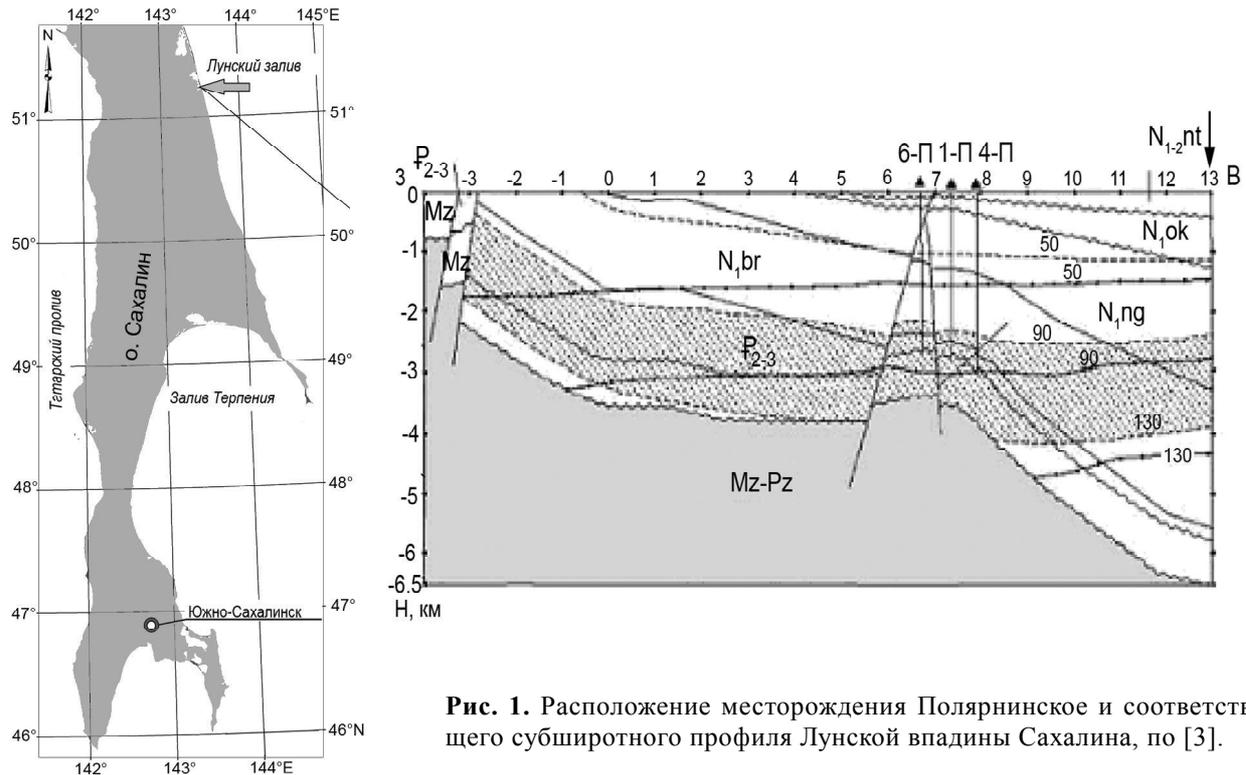


Рис. 1. Расположение месторождения Полярнинское и соответствующего субширотного профиля Лунской впадины Сахалина, по [3].

ную зависимость коэффициента поглощения от ряда параметров к единственной зависимости от V_p . Эта зависимость соответствует тенденции, что в указанной серии пород: чем выше степень консолидации, тем больше V_p .

Важное значение для описания массива имеет коэффициент Пуассона. Этот параметр имеет наглядный физический смысл и удобен для оценки физического состояния веществ на различных глубинах [7]. Он также может указывать на особенности геодинамических условий блоков земной коры [13] и различие тектонических режимов регионов [10]. По мнению автора работы [12], коэффициент Пуассона для континентальных пород значительно ниже, чем для океанических с такой же скоростью продольных волн. Дифференциация пород и руд по коэффициенту Пуассона может быть также использована для характеристики вещественного состава отдельных толщ горных пород и прямых поисков некоторых типов полезных ископаемых [6]. Распределение упругих модулей Сахалино-Курильского региона рассматривалось в ряде работ [1, 2], основанных на сейсмологических данных. Были получены оценочные значения для глубинных слоев земной коры и верхней мантии, но из-за особенностей сейсмологических данных (длины волн порядка 10 км) разрешение по глубинам ограничено. Оценкам коэффициента Пуассона терригенных по-

род, залегающих в верхних слоях (первые километры), посвящено большое количество работ. Существуют “табличные” значения Пуассона как отечественных, так и зарубежных авторов [5,15], согласно которым μ зависит от множества факторов, таких как степень флюидонасыщения, размер зерен, степень консолидации и других параметров. В работе [14] приводятся следующие значения коэффициента Пуассона терригенных и карбонатных пород, полученные на основе акустических исследований: для песчаников $0.01 < \mu < 0.24$, для глинистых сланцев $0.12 < \mu < 0.28$, для глин $0.17 < \mu < 0.50$. Для алевролитов рекомендуется использовать значение 0.08. Данные этой работы широко используются в нефтегазовой отрасли. В работе [5] приводятся табличные значения коэффициента Пуассона терригенных пород Донецкого, Кузнецкого и Печорского угольных бассейнов. Данные имеют достаточно большой разброс значений. Так, например, песчаники характеризуются значениями 0.13–0.50, глинистые сланцы – 0.15–0.27, аргиллиты – 0.20–0.30, алевролиты – 0.16–0.34. Использование таких данных требует подробной информации об основных характеристиках пород с искомым значением коэффициента Пуассона, таких как тип породы, зернистость, флюидонасыщение, наличие цемента, пористость, карбонатность. С учетом этой информации можно выбрать наиболее подходящие табличные значения μ .

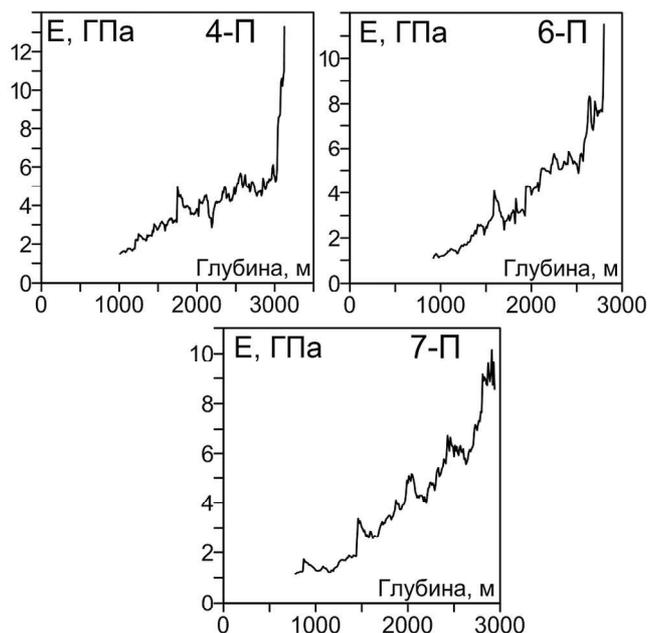


Рис. 2. Модуль Юнга (E) для различных глубин скважин 4-П, 6-П, 7-П.

Продолжая интерпретацию данных акустического каротажа, можно попытаться по полученным значениям модуля Юнга и модуля сдвига найти коэффициент Пуассона, μ . Для однородных и изотропных сред известно соотношение

$$G = 0.5 E / (1 + \mu). \quad (3)$$

Разрешая (3) относительно μ и используя (1), (2), можно получить следующее эмпирическое выражение для коэффициента Пуассона

$$\mu = 1.27 V_p^{-0.07} - 1. \quad (4)$$

Это выражение описывает весьма слабую зависимость μ от меняющегося с глубиной значения скорости продольных волн. Расчет по формуле (4) показал, что в диапазоне глубин 1–3 км, для которого имеются данные о скоростях V_p , значения коэффициента Пуассона лежат в пределах 0.18–0.22. Эти значения попадают в середину диапазона значений, указанных в работе [14] для песчаников и глинистых сланцев.

Другим методом оценки коэффициента Пуассона в отсутствие данных лабораторных измерений является метод Андерсона [8]. Этот метод позволяет получить оценки μ даже в слое у дневной поверхности, где акустический каротаж обычно не проводится. В основу метода положена взаимосвязь отклонений значений μ от среднего базового значения со степенью глинистости терригенной породы. В нашем случае в качестве базового (реперного) значения можно принять $\mu_0 = 0.24$ для чистого песчаника Лунской впадины. Степень глини-

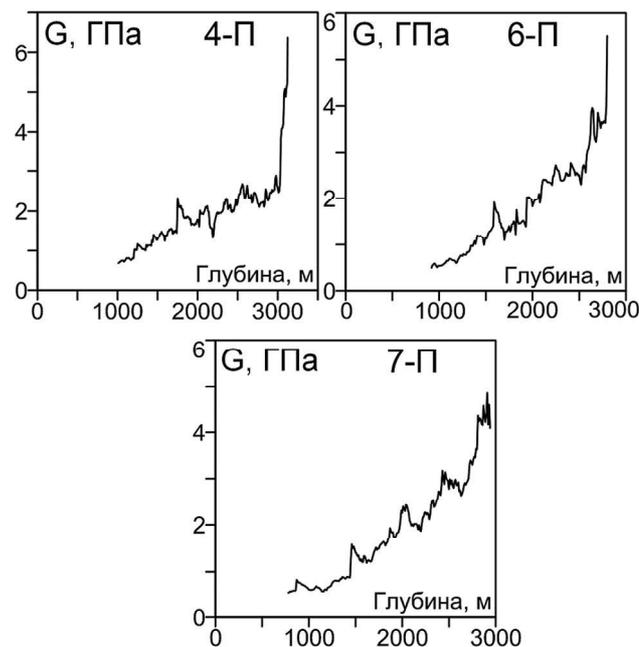


Рис. 3. Модуль сдвига G) для различных глубин скважин 4-П, 6-П, 7-П.

стости терригенных пород, в свою очередь, оценивается геофизическим методом [8] по изменению естественной гамма-активности пород, залегающих на различных глубинах. Физическая основа методики так называемого гамма-каротажа (ГК) заключается в том, что радиоактивность горных пород определяется, в основном, содержанием урана, тория и калия-40. Среди осадочных пород повышенным содержанием этих элементов характеризуются глины, аргиллиты, глинистые сланцы. Пески и песчаники относятся к породам с низкой радиоактивностью. Согласно [8], коэффициент глинистости q предложено определять по формуле:

$$q = \frac{\gamma - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \quad (5)$$

где γ – текущее значение естественной гамма-активности пород по данным гамма-каротажа (ГК), γ_{\min} – минимальное значение естественной гамма активности пород по данным ГК, γ_{\max} – максимальное значение естественной гамма-активности пород по данным ГК. Теоретический минимум коэффициента q соответствует слоям песчаника, для которых $\gamma = \gamma_{\min}$. К преимуществам методики можно отнести и то, что каротаж ГК, как правило, проводится от дневной поверхности.

По методике Андерсона [8] коэффициент Пуассона μ определяется с помощью эмпирической формулы:

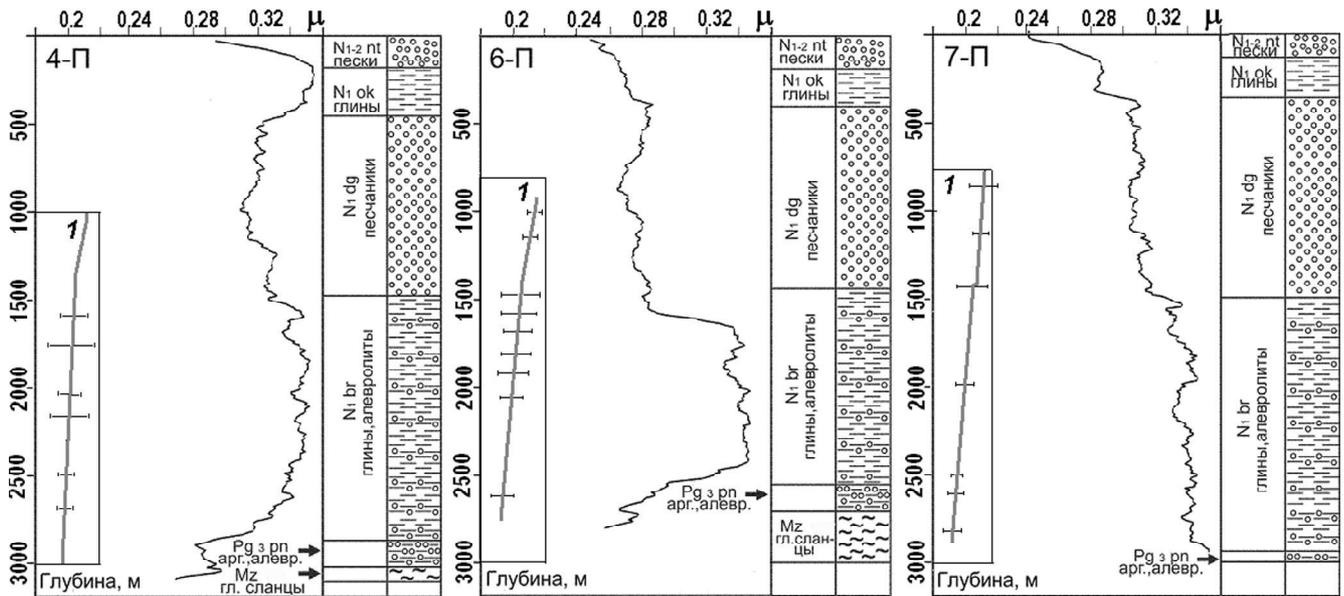


Рис. 4. Коэффициент Пуассона, μ , для различных глубин скважин 4-П, 6-П, 7-П, по данным ГК с калибровкой по коэффициенту глинистости (5).

Врезка 1 – сглаженная зависимость μ от глубины по данным о скоростях V_p , доверительные интервалы построены по наибольшему отклонению от тренда. Литология отмеченных на рисунке слоев, по данным бурения (шламограмма и керн): $N_{1-2} \text{ pt}$ – нутовская свита: пески, $N_1 \text{ ok}$ – окобыкайская: глины, $N_1 \text{ dg}$ – дагинская: песчаники, $N_1 \text{ br}$ – борская: глины, алевролиты, $Pg_3 \text{ pn}$ – пиленгская: аргиллиты, алевролиты, Mz – глинистые сланцы.

$$\mu = 0.125q + \mu_0 \quad (6)$$

Расчитанные данные коэффициента Пуассона для скважин 4-П, 6-П, 7-П представлены на рис. 4. Для сопоставления показана сглаженная зависимость (тренд) μ , вытекающая из формулы (4). В рисунок также включены сведения о стратиграфии и литологии.

Результаты расчета показывают, что значения коэффициента Пуассона изменяются с глубиной не монотонно. Можно отметить зависимость μ от литологии и стратиграфии, например, нутовская свита характеризуется значениями коэффициента Пуассона 0.24–0.36, окобыкайская – 0.27–0.36, дагинская – 0.26–0.34, борская – 0.32–0.36, пиленгская – 0.24–0.29. Зависимости коэффициента Пуассона от глубины, определенные для разных скважин, обнаруживают хорошую корреляцию. Наблюдаемое в некоторых интервалах глубин различие в значениях μ для одной и той же свиты объясняется возможной разностью в литологии и фазовой неоднородностью.

Сравнение расчетов значений μ двумя методами выявило, что наибольшее различие наблюдается в интервале глубин 1500–2500 м, т.е. в более глинистых породах борской свиты (рис. 4). Для интервала 1000–1500 м оценки коэффициента Пуассона отличаются примерно на 30 %. Это меньше, чем разброс значений μ , согласно [5, 15]. Различие результатов,

полученных двумя методами, может быть связано с тем, что они отражают разные свойства отложений. Акустический метод, основанный на выражениях (1)–(4), предполагает квазиоднородную деформацию массива “как целого”. В другом методе, основанном на данных гамма-каротажа, роль глинистых фракций (т.е. гетерогенность среды) становится принципиальной. Пластические деформации в глинистых слоях/прослоях могут менять условия распространения акустических волн, принятые в [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере Полярнинского месторождения о. Сахалин на основе данных акустического и радиоактивного каротажа рассчитаны модуль сдвига, модуль Юнга и коэффициент Пуассона с использованием эмпирических формул. Полученные зависимости модуля сдвига и модуля Юнга от глубины являются монотонными, но не сводятся к линейному росту. Более быстрое возрастание по сравнению с линейным трендом наблюдается в интервале глубин 2700–3000 м. На этом интервале происходит смена стратиграфии – переход от неогеновых отложений к палеогеновым. Кроме того, для данного интервала характерно пересечение ряда наклонных разломов. Полученные распределения геомеханических параметров могут использовать-

ся при вычислениях “окна стабильности” (диапазона изменения) бурового раствора, для решения задач стабильности стенок скважин данного месторождения, а также для оценок предельных горизонтальных и вертикальных напряжений [4, 9]. Тем не менее, приближенный характер расчетов, который проявился при сопоставлении значений коэффициента Пуассона, полученных двумя методами, означает, что рассмотренные методики желательно дополнять (хотя бы эпизодически) более точными методами многоволнового акустического каротажа или лабораторными исследованиями кернов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Злобин Т. К. Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 150 с.
2. Злобин Т. К., Каменев П. А. Распределение поля упругих напряжений в литосфере Охотоморского региона: Материалы конф. “Тектоника, глубинное строение и геодинамика Востока Азии”: IV Косыгинские чтения. Хабаровск, 2003.
3. Исаев В. И., Гуленок Р. Ю., Веселов О. В. и др. Компьютерная технология комплексной оценки нефтегазового потенциала осадочных бассейнов // Геология нефти и газа. 2002. № 6. С. 48–54.
4. Каменев П. А., Валетов С. А. Оценка пластовых давлений по данным электрического каротажа на примере Полярнинского месторождения о. Сахалин // НТВ Каротажник. Тверь: Изд-во АИС, 2011. Вып. 207. С. 17–28.
5. Каспарьян Э. В., Козырев А. А., Иофис М. А., Макаров А. Б. Геомеханика. М.: ВШ, 2006. 503 с.
6. Немзоров Н. И., Воинов К. А. О выделении блоков земной коры с различными значениями коэффициента Пуассона // Упругие волны промышленных взрывов и исследование земной коры Урала. Свердловск, 1978. С. 51–61.
7. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. М.: Наука, 1980. 184 с.
8. Anderson R. A., Ingram D. S., Zanier A. M. Determining fracture pressure gradients from well logs // Journ. of Petrol. Techn., Nov. 1973. V. 25. P. 1259–1268.
9. Bogomolov L. M., Kamenev P. A. Estimation of geomechanic properties of terrigenous rocks with using logging data from deep borehole // Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Тез. докл. 5 Междунар. симпоз., г. Бишкек 19–24 июня 2011. В 2 т. Т. 2. Бишкек: НС РАН, 2011. С. 134–137.
10. Hayakawa M., Balakrishna S. An explanation for the high ultrasonic velocity in Indian rock // Geophys. Prosp. 1961. V. 9, N 1. P. 74–85.
11. Horsrud P. Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations // SPE Drilling & Completion. SPE 56017. 2001. V. 16, N 2. P. 68–73.
12. Hyndman R. D. Poisson's ratio in the oceanic crust – a review // Tectonophysics. 1979. V. 59. P. 321–333.
13. Nishimura E., Kamitsuki A., Kishimoto Y. Some problems on poisson's ratio in the Earth's Crust // Tellus. 1960. V. 12, N 2. P. 236 – 241.
14. SoundTrak™ – Baker Hughes: Prospect/ Baker Hughes Incorporated (США), Internet publication, available from: http://www.bakerhughes.com/assets/media/brochures/4d482724fa7e1c27a4000001/file/30049-soundtrak_brochure-0810.pdf.pdf&fs=447746
15. Weurker, R. G. Annotated tables of strength and elastic properties of rocks // Drilling Reprint Series SPE, Dallas. 1963. N 6. P. 23–45.

P. A. Kamenev, L. M. Bogomolov, S. A. Valetov

On estimation “in situ” of geomechanic parameters of sedimentary rocks from logging

Basic geomechanic parameters of sedimentary rocks have been calculated from geophysical observations of the boreholes on Polyarninskoy oilfield, Sakhalin Island. The Young's modulus and shear modulus have been evaluated by acoustic logging data. Poisson's ratio has been estimated by two methods: based on the values of elastic moduli, and from natural gamma ray activity of the rocks. All the data obtained can be followed to construct geomechanical model of the oilfield and estimate local stress distribution pattern «in situ». Besides, these results may be applicable for estimating «in situ» stress-deformed state of the sedimentary rocks of the oilfield area.

Key words: geomechanics (geomechanic parameters), Poisson's ratio, shear modulus, Young's modulus, Sakhalin Island.